



機械学習に基づく  
RC造超高層建物の非観測階における地震時応答の推定

# 研究背景

[2011年 東北地方太平洋沖地震]  
長周期地震動により超高層建物で  
長時間の大きな揺れが発生

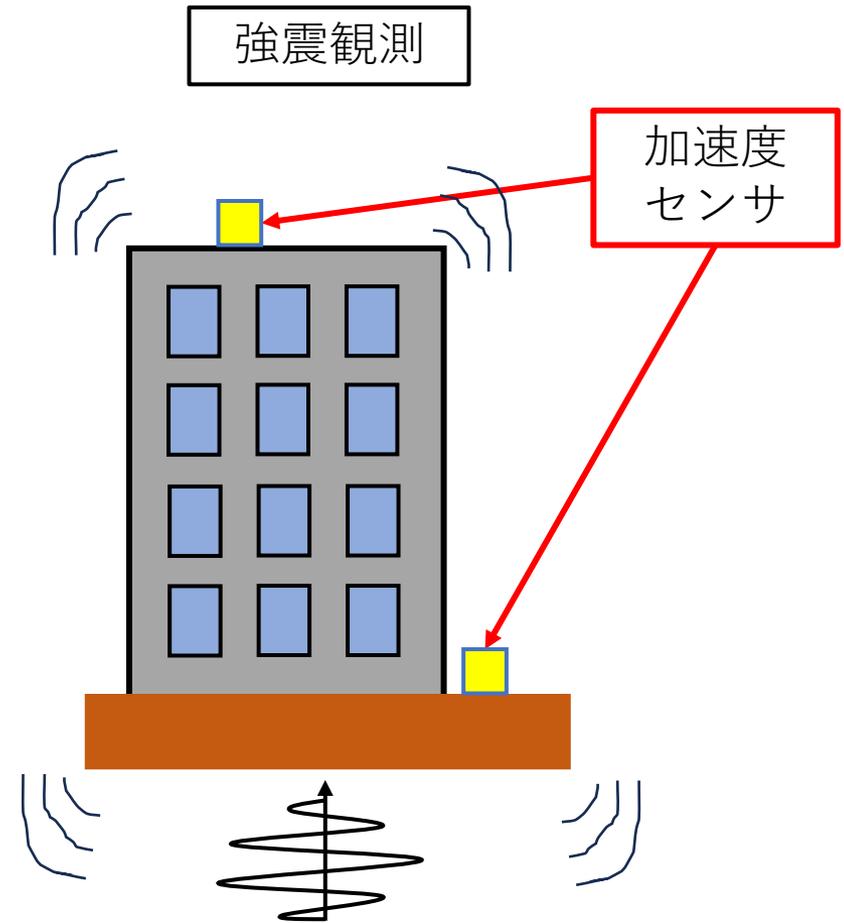
関東地方に立地するRC造超高層建物において  
固有振動数が低下<sup>1-2)</sup>



被災建物の健全性を評価するには  
地震時の建物挙動の把握が必要不可欠



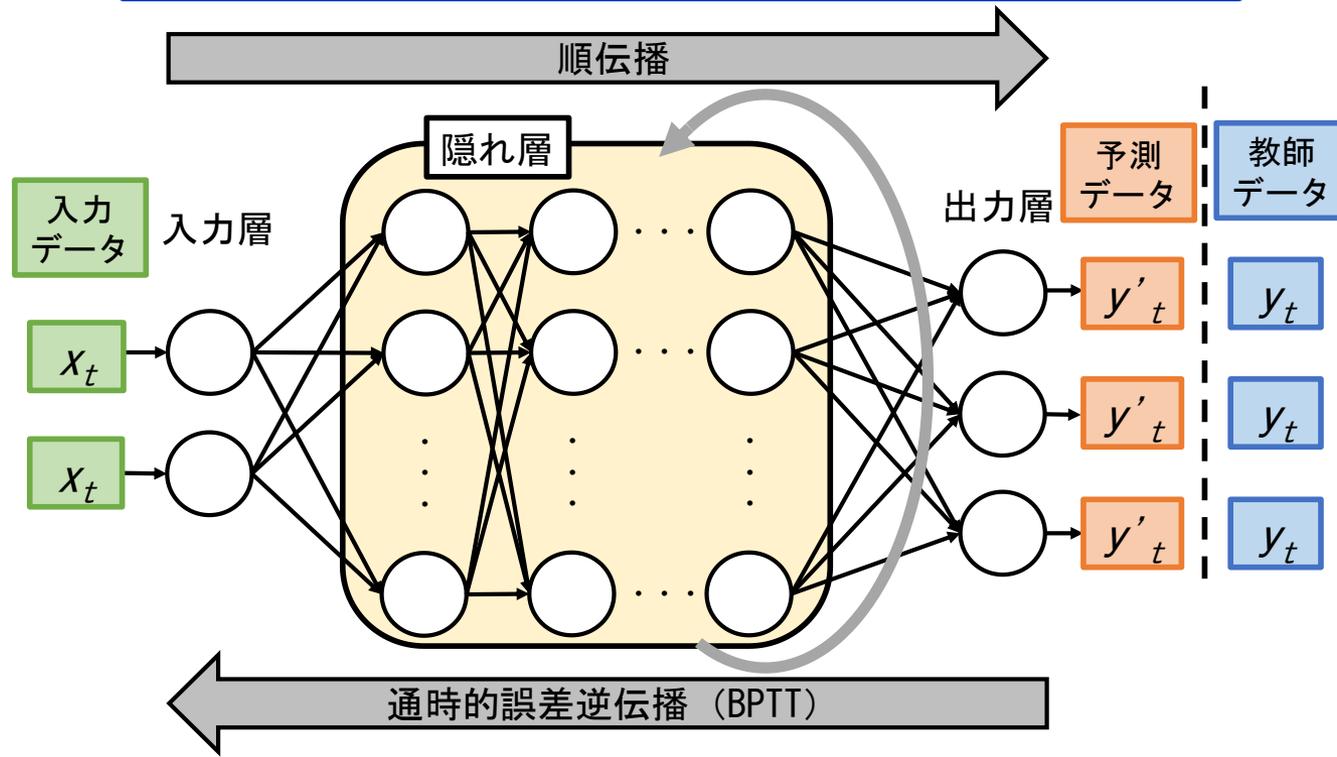
費用等の制約から全フロアに  
センサを設置することは非現実的



# 目的・手法

限られた加速度センサの情報に基づき、機械学習によってセンサ非設置階の地震時応答を推定

LSTM (Long Short Term Memory)  
時系列予測に特化



# 手法

建物の最下階・中間階・屋上階のみで強震観測を行うと想定

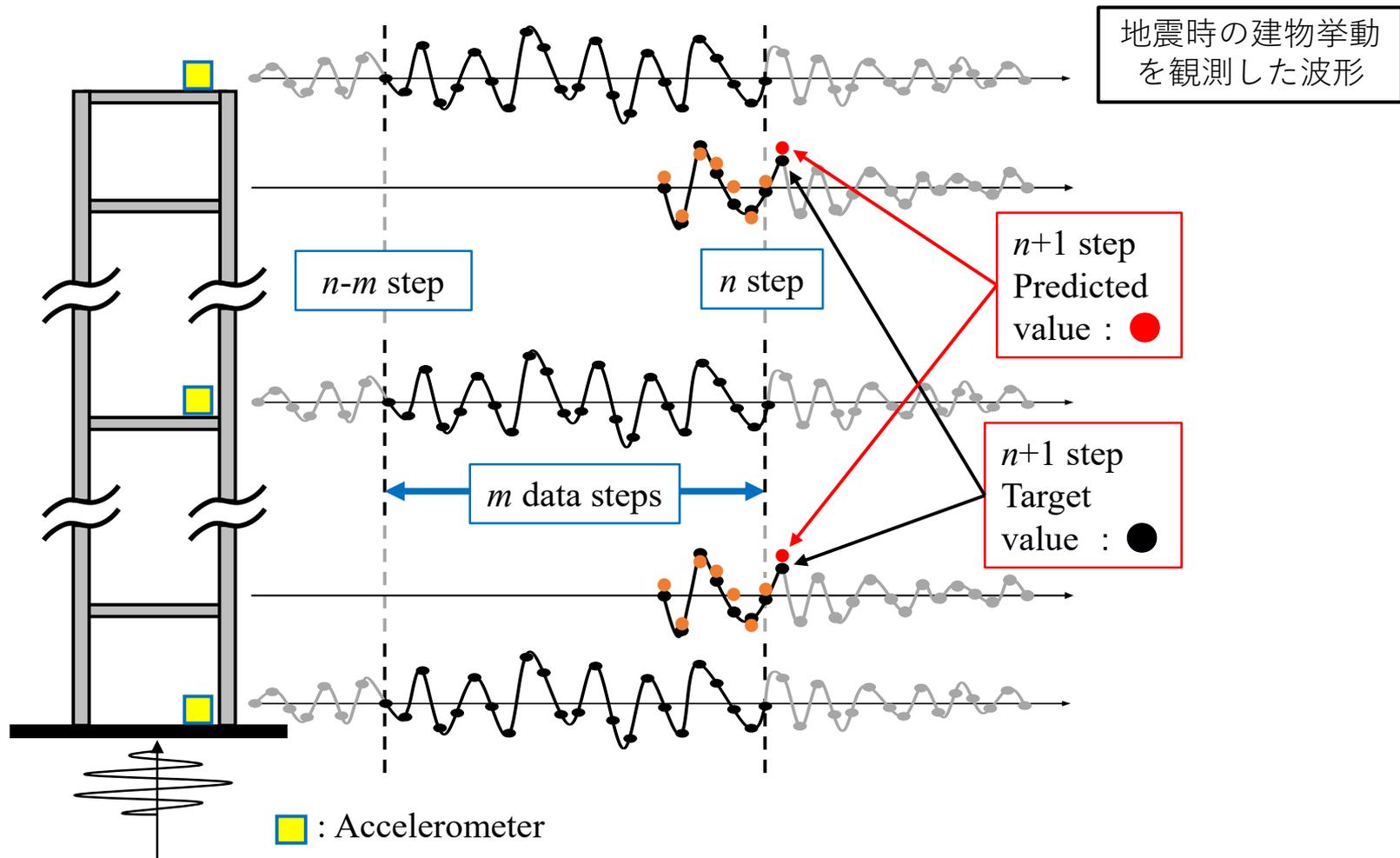


図2 LSTMを用いた非観測階の応答推定の方法

# 学習データ（入力・教師データ）作成

SNAP<sup>3)</sup> を用いて時刻歴応答解析  
(Newmark- $\beta$ 法,  $\beta = 1/4$ ,  $dt = 0.001$ )

Floor No.

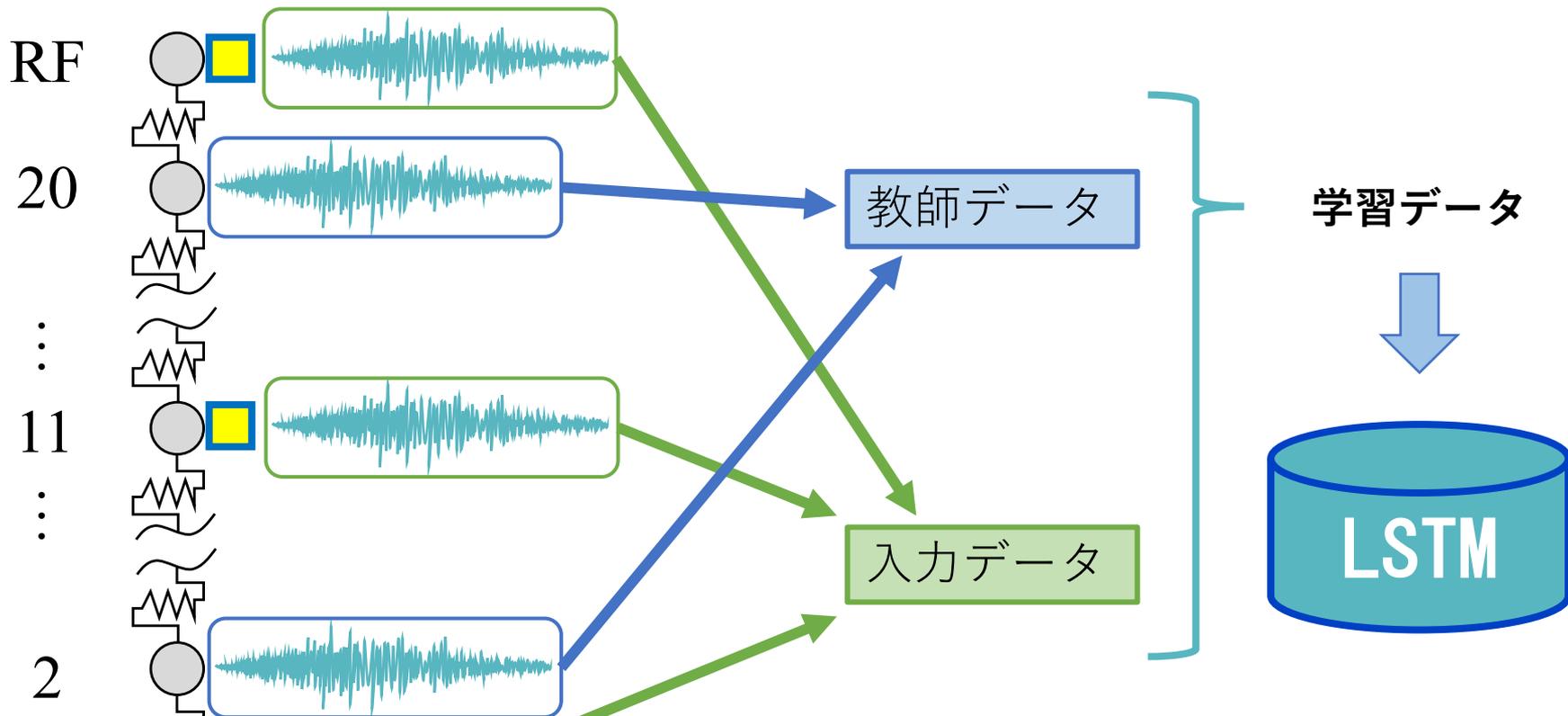


表1 学習データ作成に用いる入力地震動<sup>4)</sup>

wave name	Observation Date	Observation Location	Component	Recording Time (s)	Max. Acc. (m/s <sup>2</sup> )	Predominant Frequency (Hz)
wave 1	2011.03.11.14.46	茨城県 岩瀬 (IBRH11)	EW	299.99	-8.27	1.83
wave 2	2018.09.06.03.07	北海道 追分 (HKD127)	EW	283.99	9.04	3.21
wave 3	2021.02.13.23.07	宮城県 山元 (MYGH10)	NS	299.99	14.3	2.51
wave 4	2024.01.01.16.10	石川県 富来 (ISK006)	EW	299.99	-26.8	4.69
wave 5	2024.01.01.16.10	石川県 七尾 (ISK007)	NS	299.99	-3.74	0.879
wave 6	2011.03.11.14.46	宮城県 大和 (MYG009)	NS	299.99	4.51	1.45

入力地震動

# LSTMによる推定精度の検討

Floor No.

RF

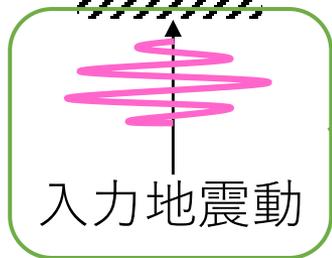
20

⋮

11

⋮

2



入力



出力

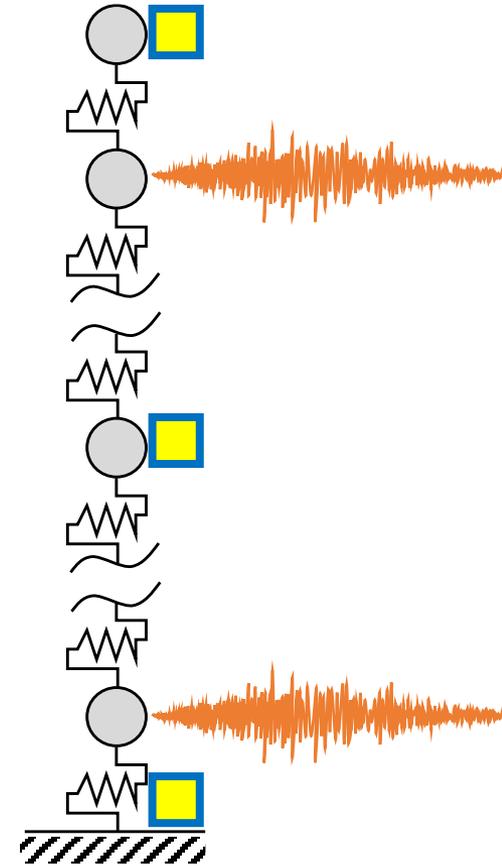
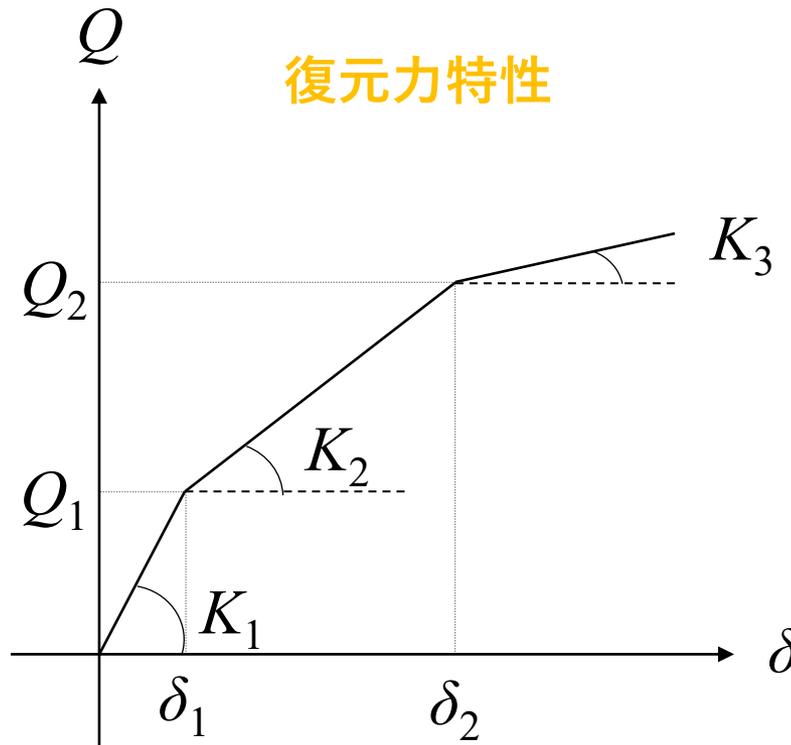
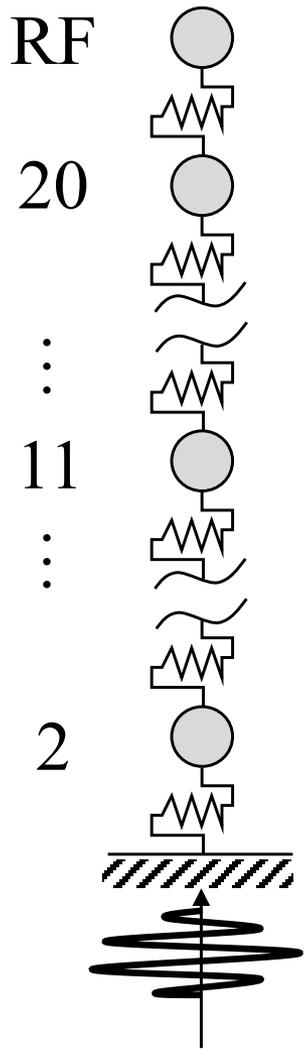


表1 推定データ作成に用いる入力地震動<sup>4)</sup>

wave name	Observation Date	Observation Location	Component	Recording Time (s)	Max. Acc. (m/s <sup>2</sup> )	Predominant Frequency (Hz)
wave 1	2011.03.11.14.46	茨城県 岩瀬 (IBRH11)	EW	299.99	-8.27	1.83
wave 2	2018.09.06.03.07	北海道 追分 (HKD127)	EW	283.99	9.04	3.21
wave 3	2021.02.13.23.07	宮城県 山元 (MYGH10)	NS	299.99	14.3	2.51
wave 4	2024.01.01.16.10	石川県 富来 (ISK006)	EW	299.99	-26.8	4.69
wave 5	2024.01.01.16.10	石川県 七尾 (ISK007)	NS	299.99	-3.74	0.879
wave 6	2011.03.11.14.46	宮城県 大和 (MYG009)	NS	299.99	4.51	1.45

# 学習および推定に用いる地震応答解析モデル

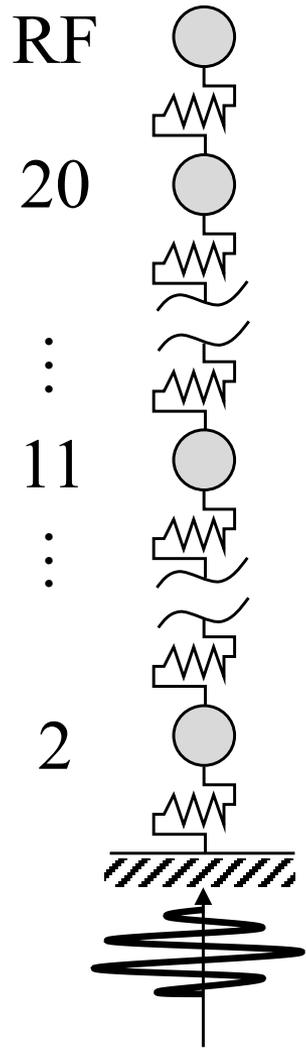
Floor No.



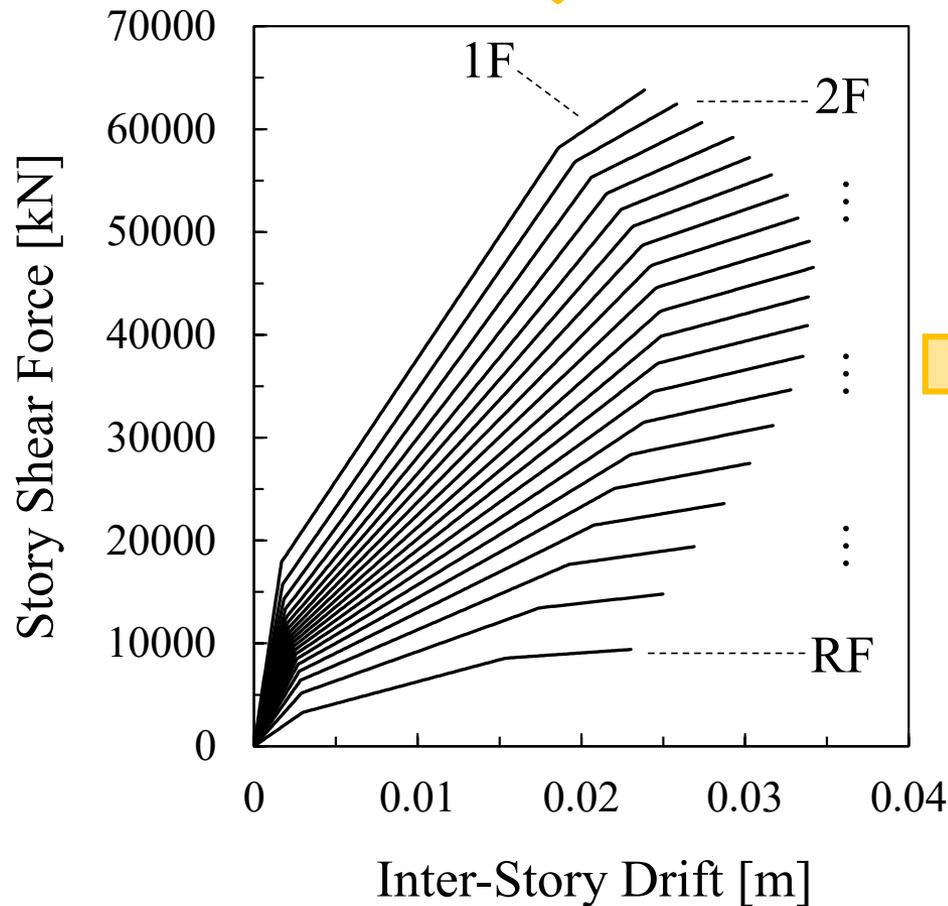
- ・ 非線形のせん断型多質点系でモデル化<sup>5)</sup>
- ・ 各層の復元力特性  
→ 剛性低減型トリリニア
- ・ 減衰 → 瞬間剛性比例型
- ・ 階数 → 20階建てのRC造
- ・ 減衰定数  $h$  → 0.03
- ・ 基準階面積 → 900[m<sup>2</sup>]

# 学習および推定に用いる地震応答解析モデル

Floor No.



各層の復元力特性



**model 1** と記す

1次固有周期

→ 1.20 [s]

# 学習および推定精度の検討に用いる地震応答解析モデル

model 1 の初期剛性を 0.5 ~ 1.3 倍した解析モデルを作成



Analy. model name	$K_1$ Ratio	Natural Period (s)			Natural Frequency (Hz)		
		mode 1	mode 2	mode 3	mode 1	mode 2	mode 3
model 1	1	1.200	0.468	0.295	0.833	2.135	3.388
model 2	0.5	1.697	0.663	0.417	0.589	1.509	2.395
model 3	0.6	1.549	0.605	0.381	0.646	1.653	2.624
model 4	0.7	1.434	0.560	0.353	0.697	1.786	2.834
model 5	0.8	1.342	0.524	0.330	0.745	1.909	3.030
model 6	0.9	1.265	0.494	0.311	0.791	2.025	3.214
model 7	1.1	1.144	0.447	0.281	0.874	2.239	3.553
model 8	1.2	1.095	0.428	0.269	0.913	2.338	3.711
model 9	1.3	1.052	0.411	0.259	0.950	2.434	3.863
model 10	0.65	1.488	0.581	0.366	0.672	1.721	2.731



【各 model を作成した理由/本研究における位置づけ】

model 1 : 超高層建物の性能評価のための時刻歴応答解析モデル (設計段階)

model 2 ~ model 6 : 竣工後から剛性が低下した状態 (経年劣化や中小地震)

model 7 ~ model 9 : 竣工直後の建物の固有周期が設計値より短くなる報告<sup>6)</sup>

# 学習および推定精度の検討に用いる地震応答解析モデル

model 1 の初期剛性を 0.5 ～ 1.3 倍した解析モデルを作成



Analy. model name	$K_1$ Ratio	Natural Period (s)			Natural Frequency (Hz)		
		mode 1	mode 2	mode 3	mode 1	mode 2	mode 3
model 1	1	1.200	0.468	0.295	0.833	2.135	3.388
model 2	0.5	1.697	0.663	0.417	0.589	1.509	2.395
model 3	0.6	1.549	0.605	0.381	0.646	1.653	2.624
model 4	0.7	1.434	0.560	0.353	0.697	1.786	2.834
model 5	0.8	1.342	0.524	0.330	0.745	1.909	3.030
model 6	0.9	1.265	0.494	0.311	0.791	2.025	3.214
model 7	1.1	1.144	0.447	0.281	0.874	2.239	3.553
model 8	1.2	1.095	0.428	0.269	0.913	2.338	3.711
model 9	1.3	1.052	0.411	0.259	0.950	2.434	3.863
model 10	0.65	1.488	0.581	0.366	0.672	1.721	2.731



【各 model を作成した理由/本研究における位置づけ】

model 1 ～ model 9 : 建物竣工前にあらかじめ作成する解析モデル

model 10 : 実際の建物 (詳細な劣化状況が不明)

# 2ケースで推定精度の比較および検討

## 各解析モデル

Analy. model name	$K_1$ Ratio	Natural Period (s)			Natural Frequency (Hz)		
		mode 1	mode 2	mode 3	mode 1	mode 2	mode 3
model 1	1	1.200	0.468	0.295	0.833	2.135	3.388
model 2	0.5	1.697	0.663	0.417	0.589	1.509	2.395
model 3	0.6	1.549	0.605	0.381	0.646	1.653	2.624
model 4	0.7	1.434	0.560	0.353	0.697	1.786	2.834
model 5	0.8	1.342	0.524	0.330	0.745	1.909	3.030
model 6	0.9	1.265	0.494	0.311	0.791	2.025	3.214
model 7	1.1	1.144	0.447	0.281	0.874	2.239	3.553
model 8	1.2	1.095	0.428	0.269	0.913	2.338	3.711
model 9	1.3	1.052	0.411	0.259	0.950	2.434	3.863
model 10	0.65	1.488	0.581	0.366	0.672	1.721	2.731

## 入力地震動

wave name	Observation Date	Observation Location	Component	Recording Time (s)	Max. Acc. ( $m/s^2$ )	Predominant Frequency (Hz)
wave 1	2011.03.11.14.46	茨城県 岩瀬 (IBRH11)	EW	299.99	-8.27	1.83
wave 2	2018.09.06.03.07	北海道 追分 (HKD127)	EW	283.99	9.04	3.21
wave 3	2021.02.13.23.07	宮城県 山元 (MYGH10)	NS	299.99	14.3	2.51
wave 4	2024.01.01.16.10	石川県 富来 (ISK006)	EW	299.99	-26.8	4.69
wave 5	2024.01.01.16.10	石川県 七尾 (ISK007)	NS	299.99	-3.74	0.879
wave 6	2011.03.11.14.46	宮城県 大和 (MYG009)	NS	299.99	4.51	1.45

### [Case 1]

- **学習** : wave 1 ~ wave 5 を用いて model 1 を地震応答解析したデータ
- **精度検討** : wave 6 を用いて model 10 を地震応答解析したデータ

# 2ケースで推定精度の比較および検討

## 各解析モデル

Analy. model name	$K_1$ Ratio	Natural Period (s)			Natural Frequency (Hz)		
		mode 1	mode 2	mode 3	mode 1	mode 2	mode 3
model 1	1	1.200	0.468	0.295	0.833	2.135	3.388
model 2	0.5	1.697	0.663	0.417	0.589	1.509	2.395
model 3	0.6	1.549	0.605	0.381	0.646	1.653	2.624
model 4	0.7	1.434	0.560	0.353	0.697	1.786	2.834
model 5	0.8	1.342	0.524	0.330	0.745	1.909	3.030
model 6	0.9	1.265	0.494	0.311	0.791	2.025	3.214
model 7	1.1	1.144	0.447	0.281	0.874	2.239	3.553
model 8	1.2	1.095	0.428	0.269	0.913	2.338	3.711
model 9	1.3	1.052	0.411	0.259	0.950	2.434	3.863
model 10	0.65	1.488	0.581	0.366	0.672	1.721	2.731

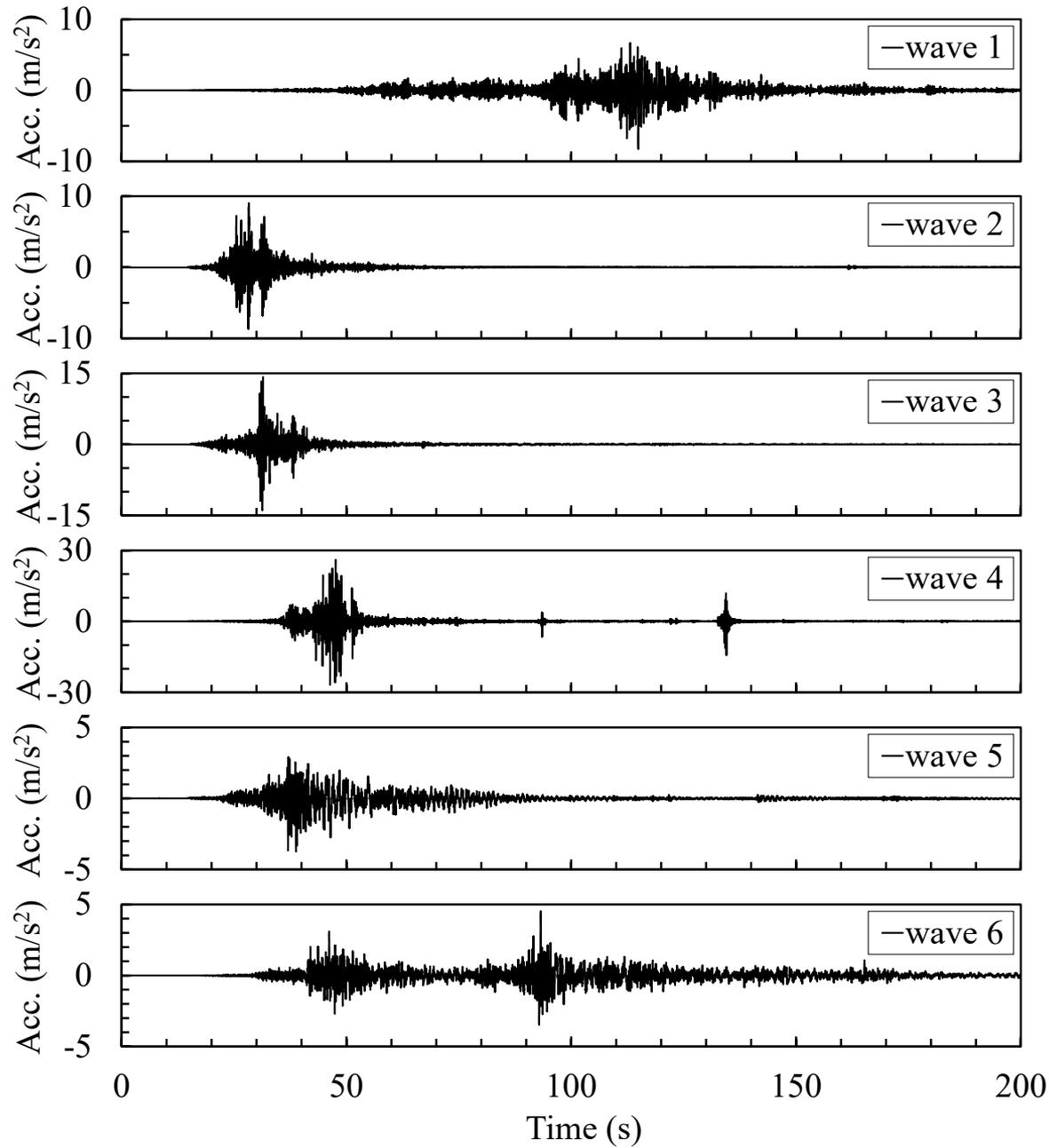
## 入力地震動

wave name	Observation Date	Observation Location	Component	Recording Time (s)	Max. Acc. (m/s <sup>2</sup> )	Predominant Frequency (Hz)
wave 1	2011.03.11.14.46	茨城県 岩瀬 (IBRH11)	EW	299.99	-8.27	1.83
wave 2	2018.09.06.03.07	北海道 追分 (HKD127)	EW	283.99	9.04	3.21
wave 3	2021.02.13.23.07	宮城県 山元 (MYGH10)	NS	299.99	14.3	2.51
wave 4	2024.01.01.16.10	石川県 富来 (ISK006)	EW	299.99	-26.8	4.69
wave 5	2024.01.01.16.10	石川県 七尾 (ISK007)	NS	299.99	-3.74	0.879
wave 6	2011.03.11.14.46	宮城県 大和 (MYG009)	NS	299.99	4.51	1.45

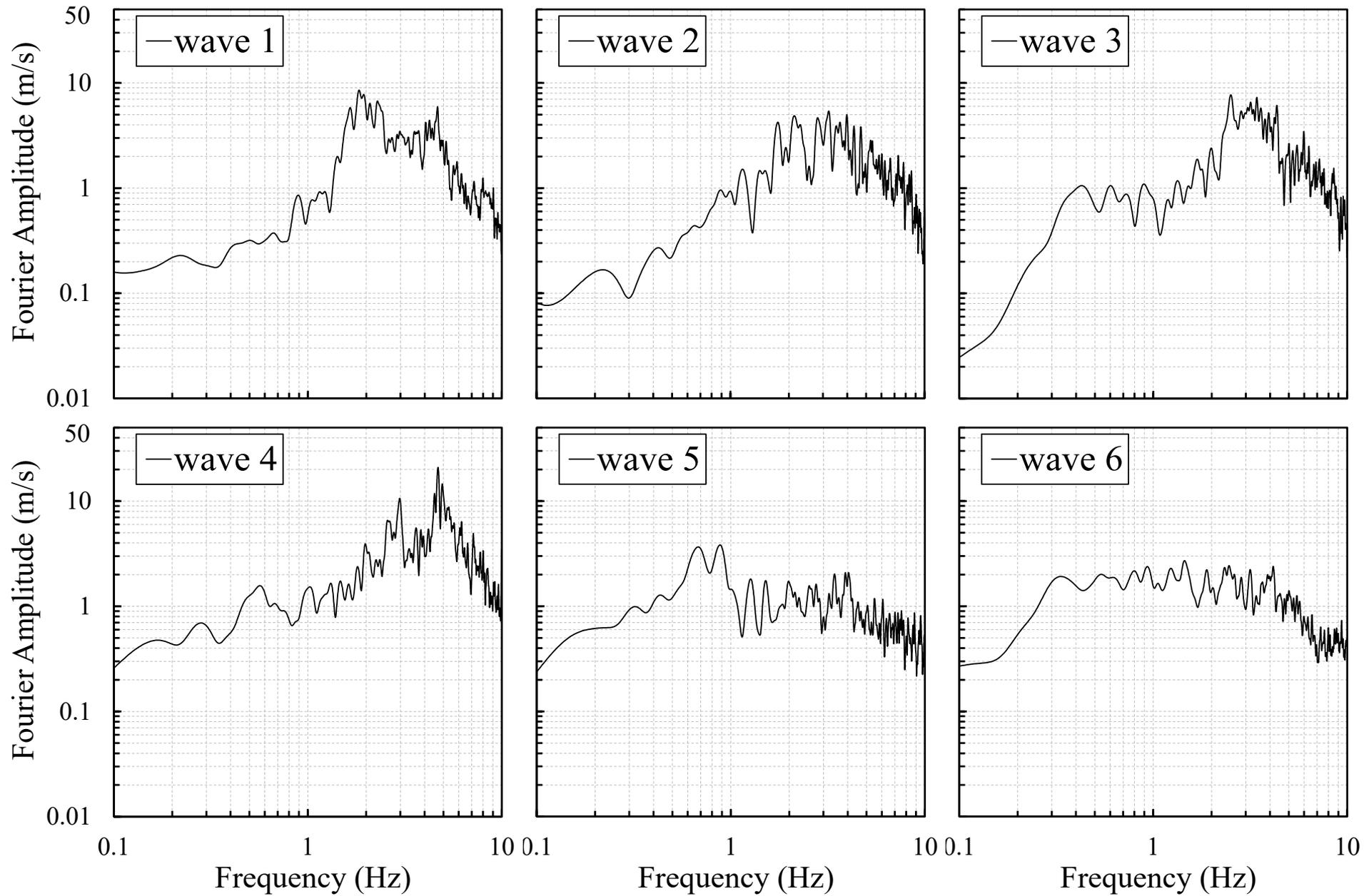
### [Case 2]

- **学習**：wave 1 ~ wave 5 を用いて model 1 ~ model 9 を地震応答解析したデータ
- **精度検討**：wave 6 を用いて model 10 を地震応答解析したデータ

# 学習および推定精度の検討に使用した入力地震動



# 学習および推定精度の検討に使用した入力地震動



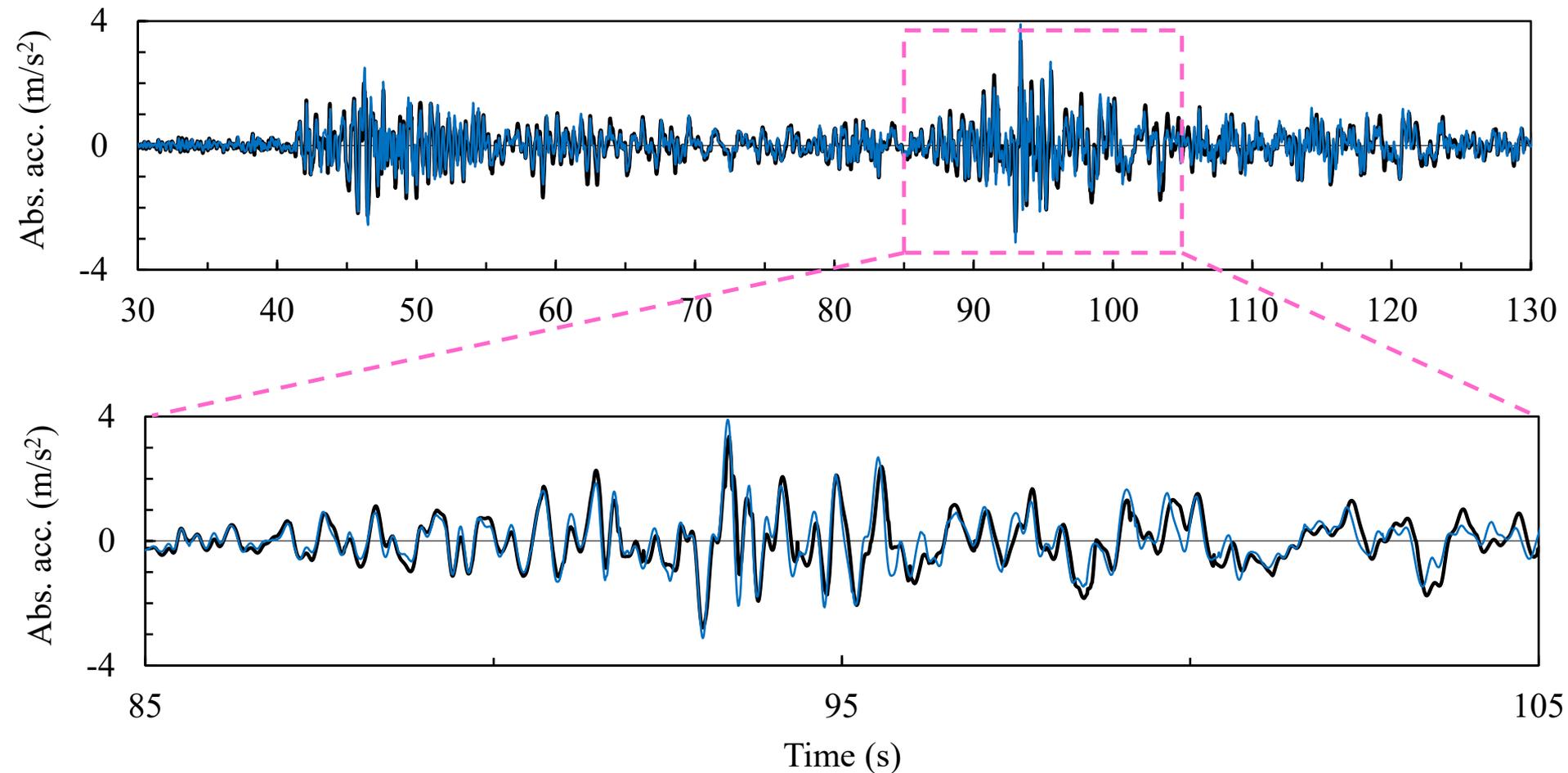
# Case 1 での推定結果

Case 1

未学習

model 10

—Target\_Absolute acc. of 7th Floor —Case 1\_Absolute acc. of 7th Floor



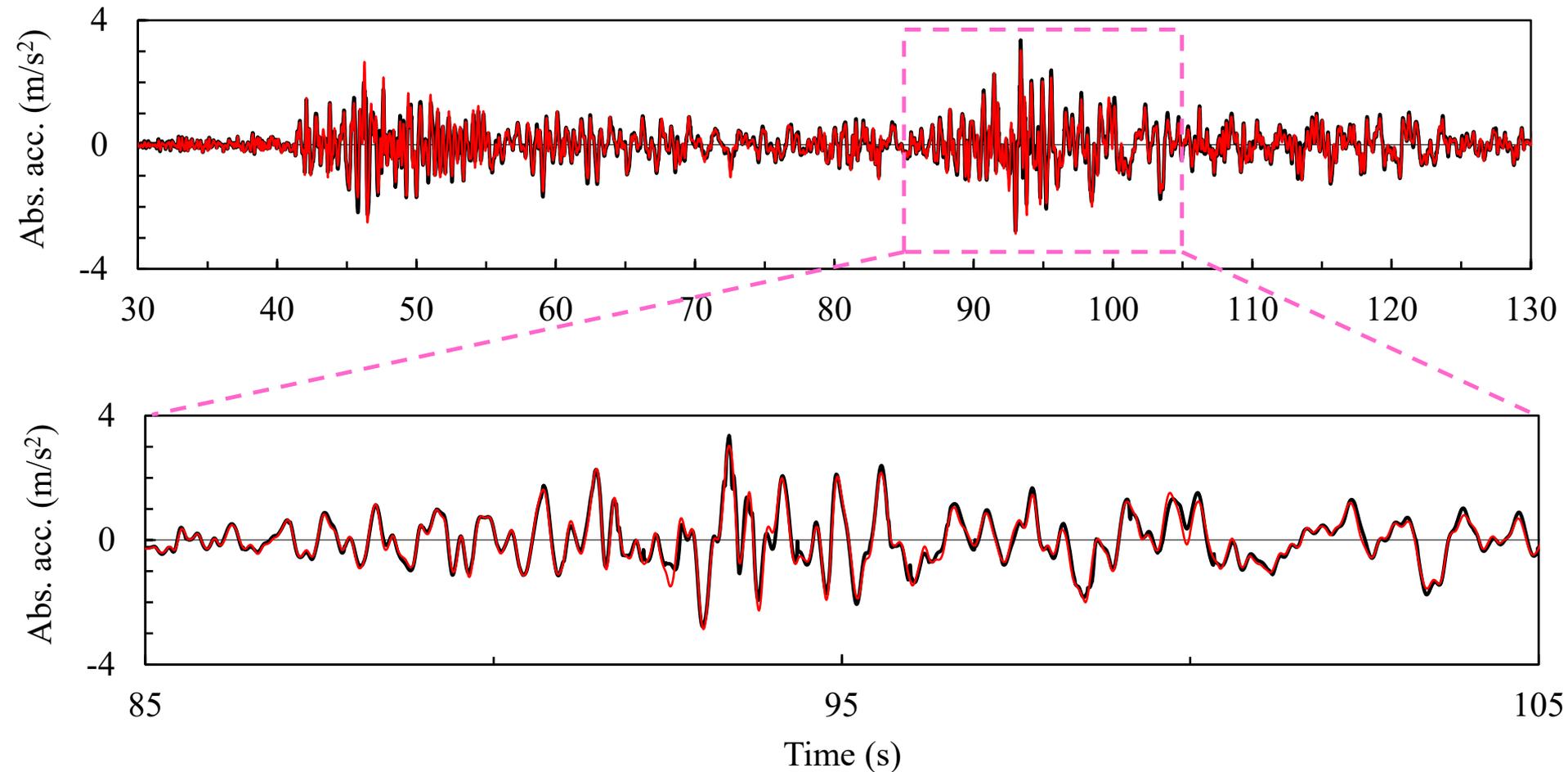
# Case 2 での推定結果

Case 2

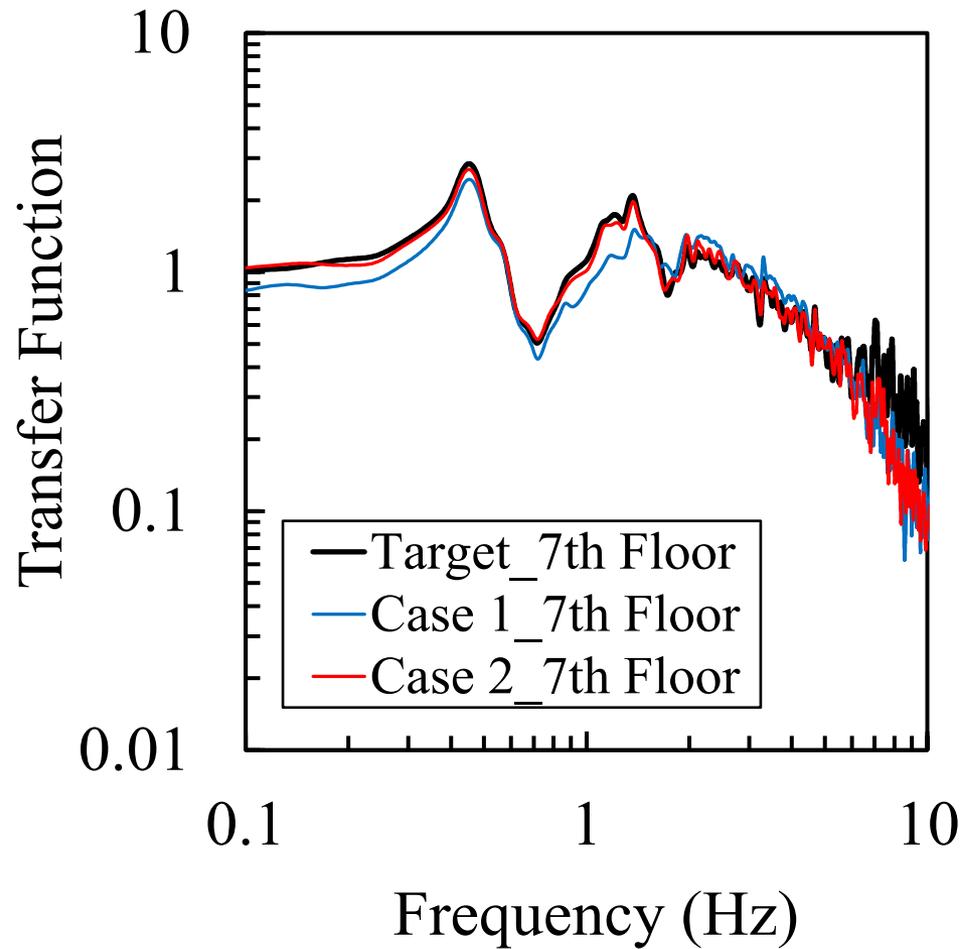
未学習

model 10

—Target\_Absolute acc. of 7th Floor —Case 2\_Absolute acc. of 7th Floor



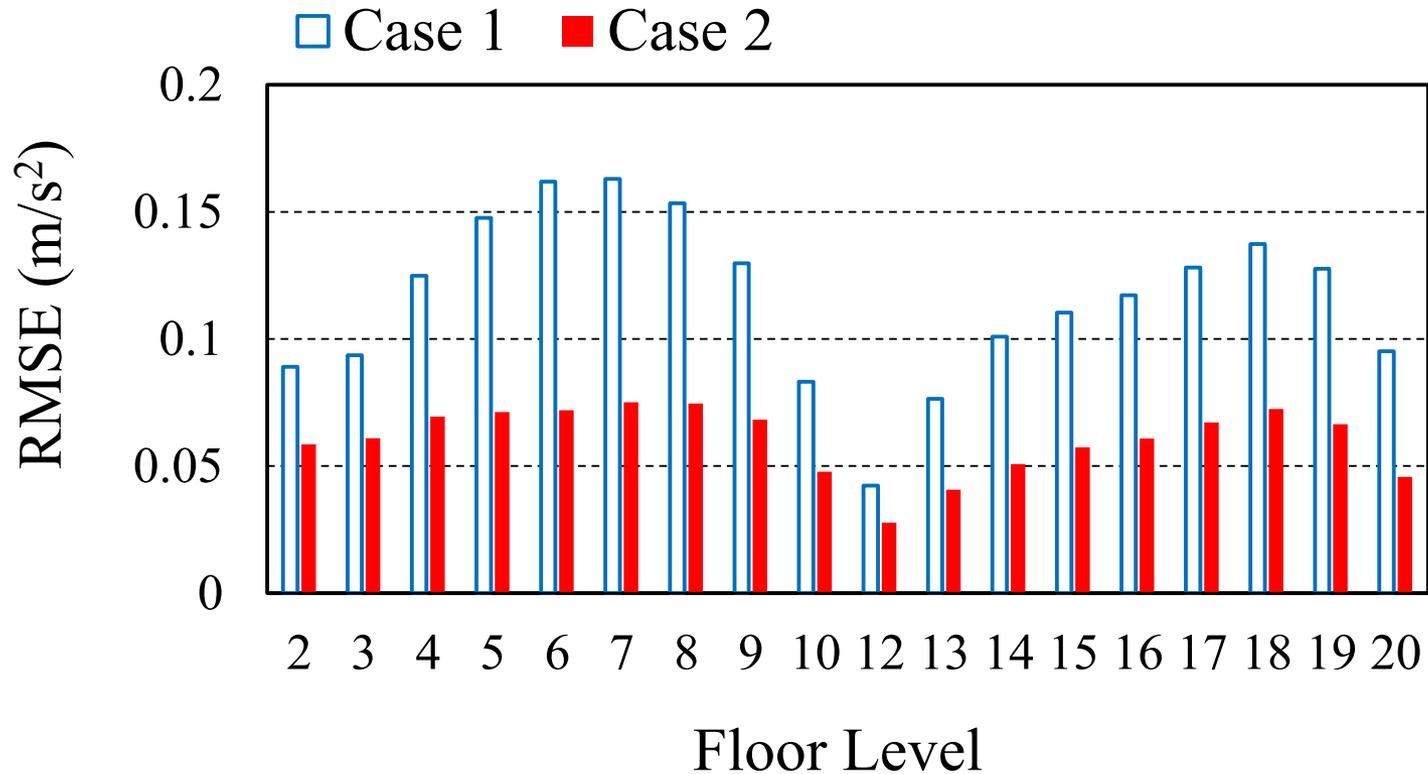
# Case 1 および Case 2 の伝達関数



良好な精度で振動特性を再現

# Case 1 と Case 2 の誤差比較

各階でのTargetと推定値の誤差を基に算出した  
二乗平均平方根誤差 (Root Mean Squared Error, **RMSE**)



解析モデルの剛性を様々に変化させた地震応答解析データで機械学習  
→ 詳細な劣化状況が未知の建物でも高精度に推定可能

# 各階の床応答の最大値の推定精度

建物の損傷評価 → 建物応答の最大値が重要な指標



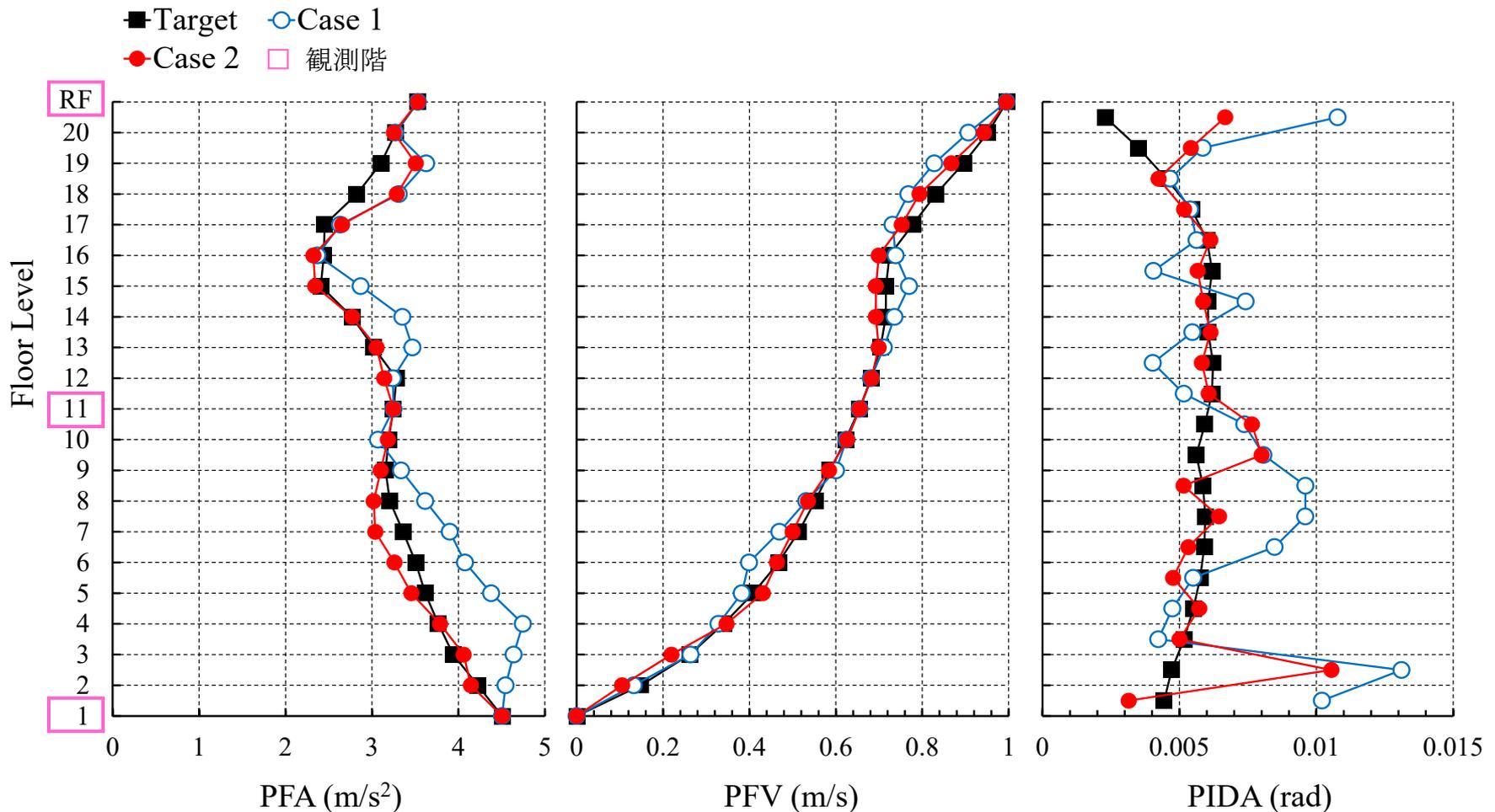
- ・ 床応答絶対加速度の最大値 (**PFA**)
- ・ 床応答相対速度の最大値 (**PFV**)
- ・ 最大層間変形角 (**PIDA**)

**Case 1** および **Case 2** は **絶対加速度** のみ推定

相対速度  
相対変位

ローカットフィルタおよび  
台形則による数値積分により算出

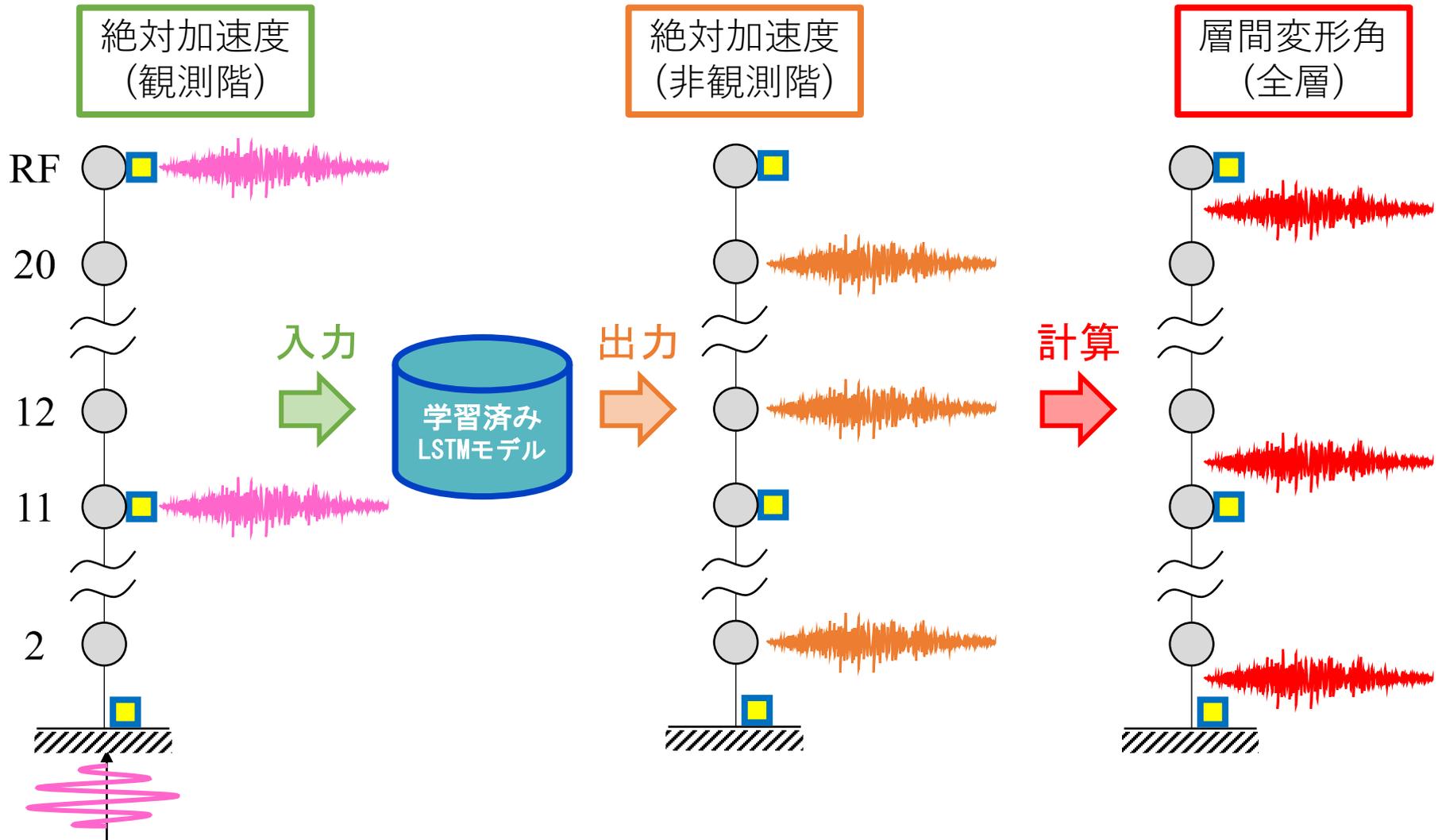
# 建物各階の床応答の最大値の高さ分布



- PFA, PFV は **Case 1** よりも **Case 2** の方が **Target** に近い結果
- PIDA は  $1/100$  [rad] を超える値も散見され精度が低い

# PIDA の推定精度向上を目的とした追加検討

Case 1 および Case 2 での流れ (再確認)

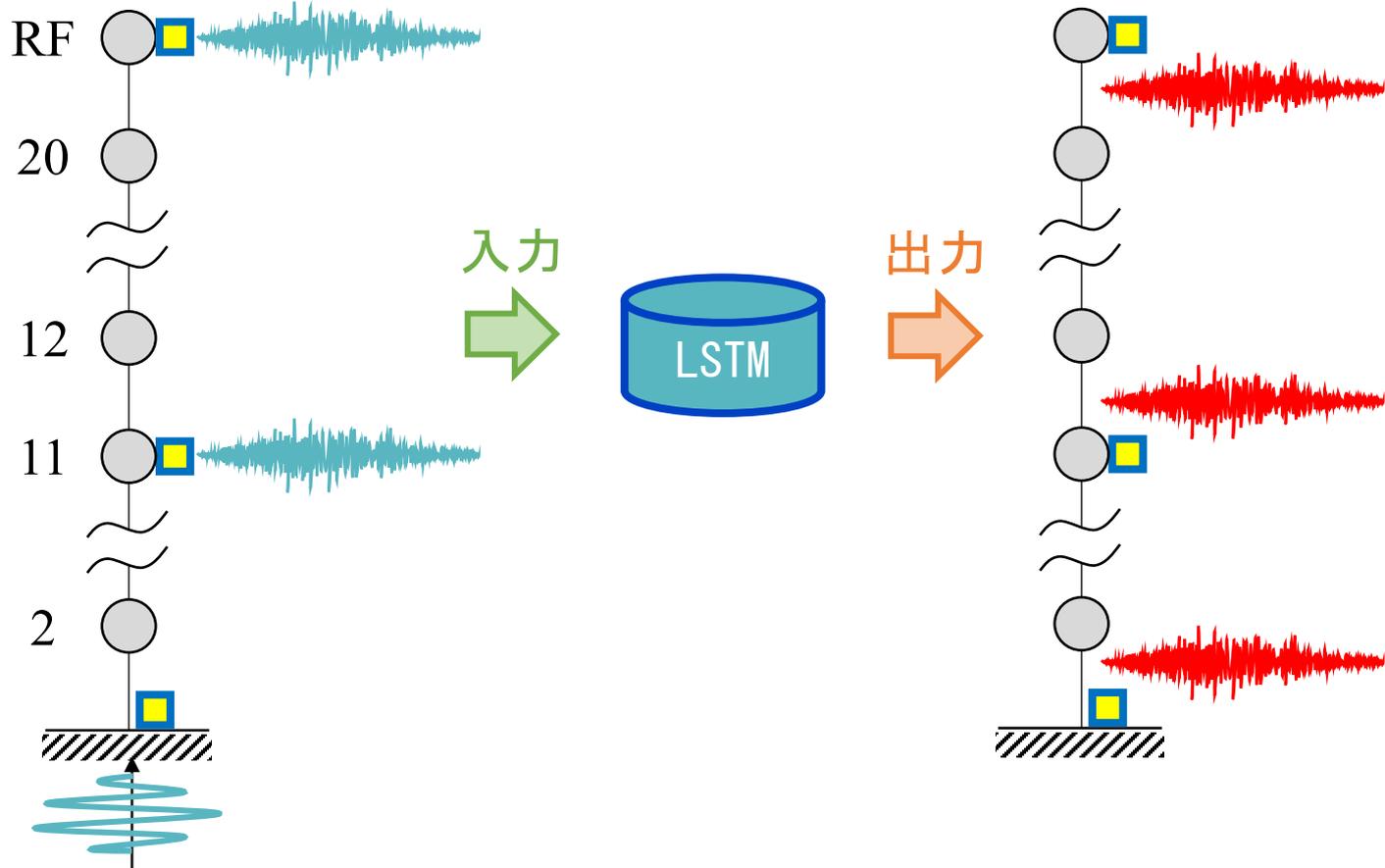


# PIDA の推定精度向上を目的とした追加検討

層間変形を直接推定するような学習を  
新たに2ケース (**Case 3**, **Case 4**) 実行

絶対加速度

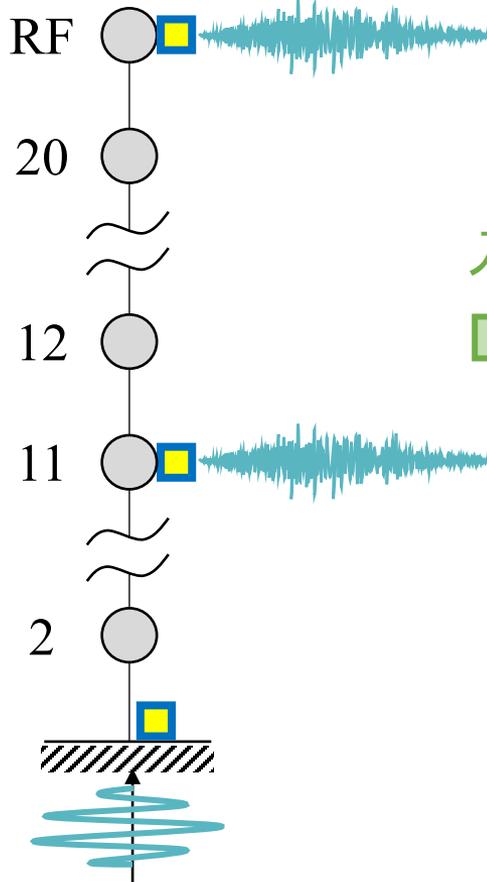
層間変形



# PIDA の推定精度向上を目的とした追加検討

## Case 3 (学習)

絶対加速度  
(観測階)

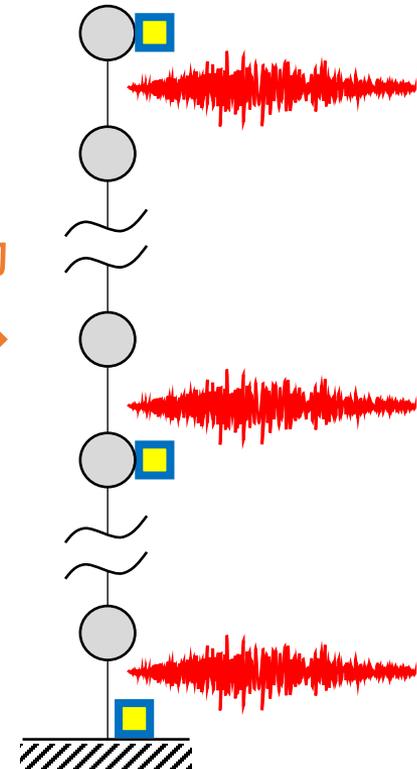


入力  
→



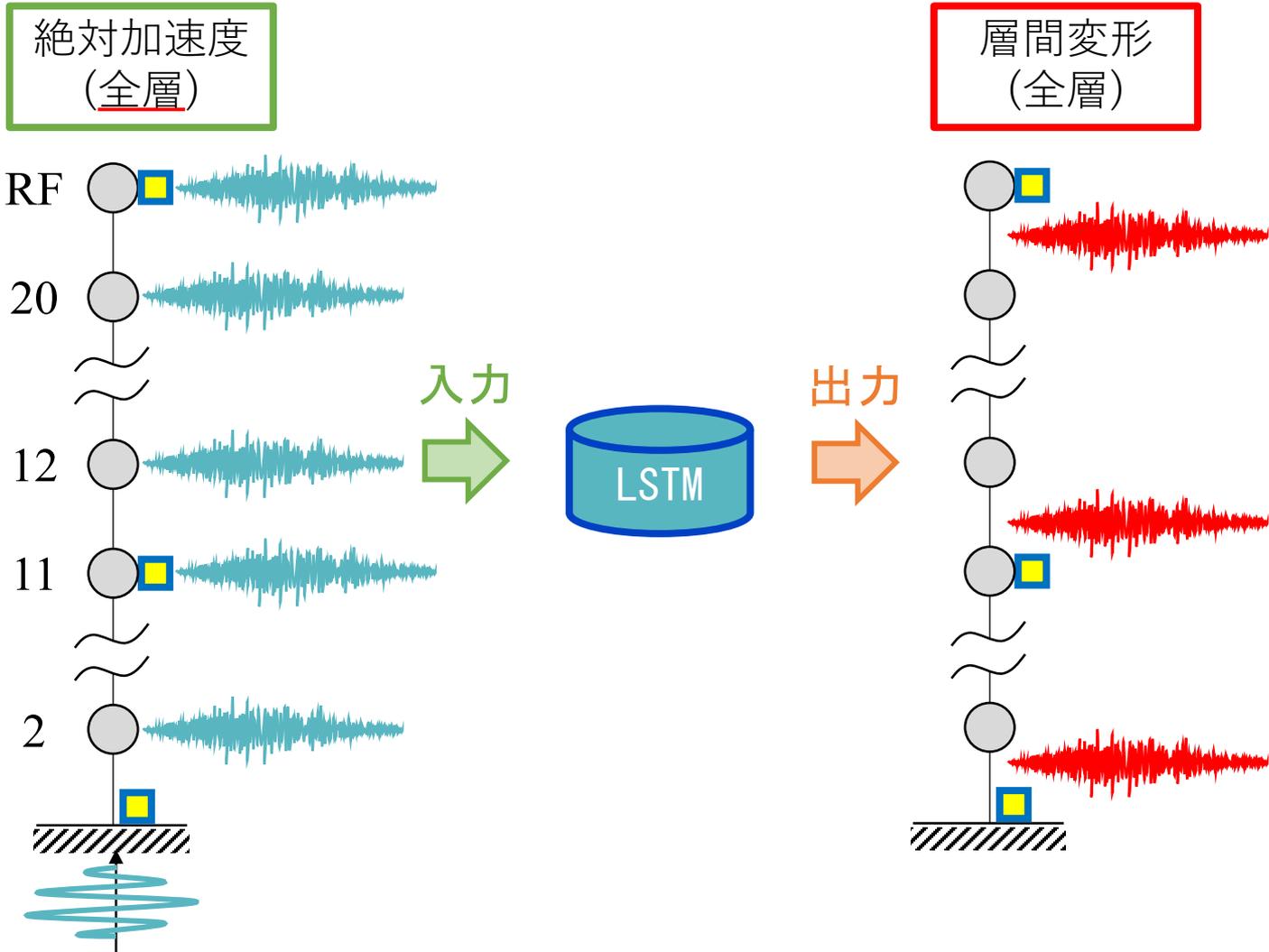
出力  
→

層間変形  
(全層)



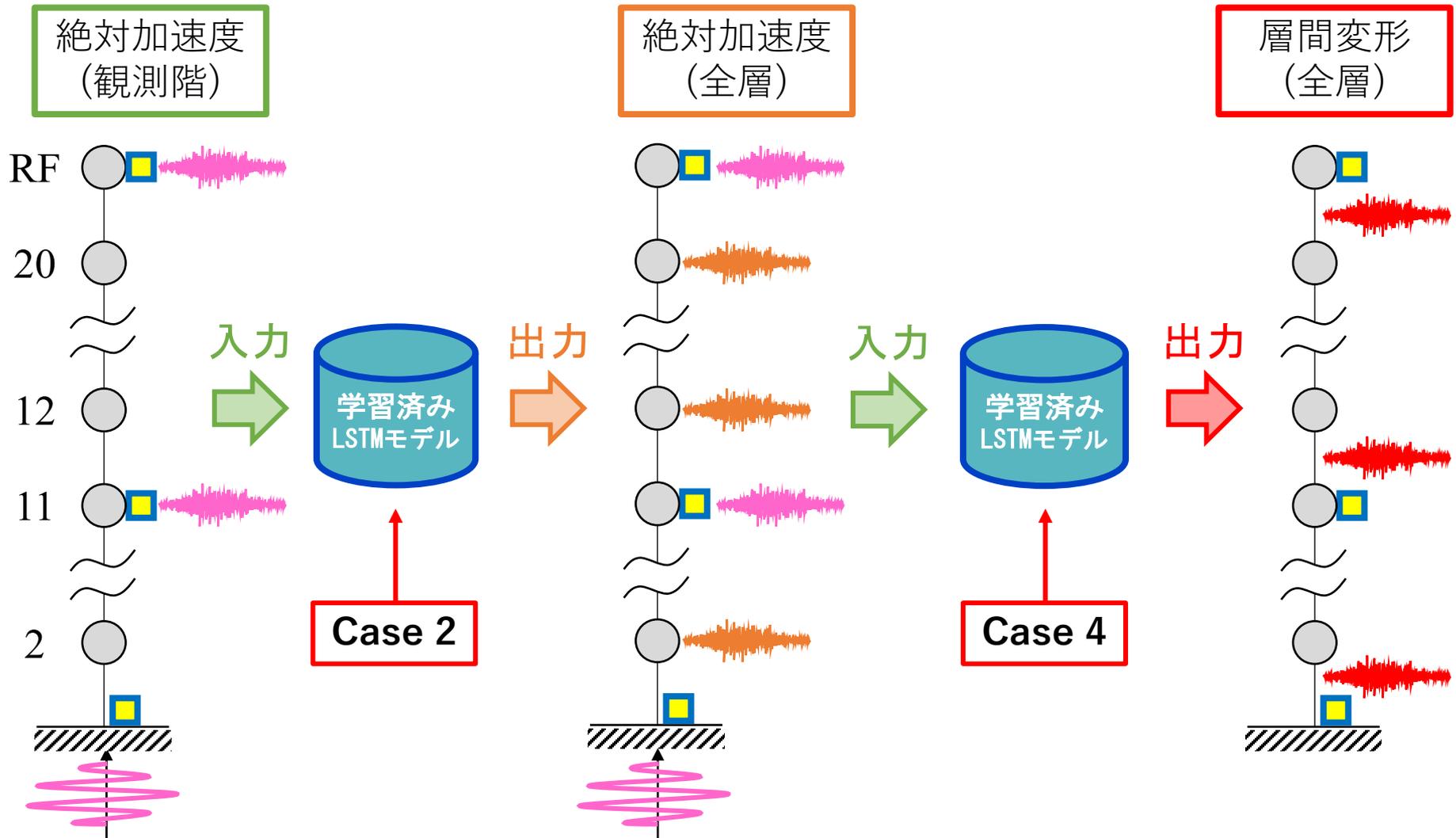
# PIDA の推定精度向上を目的とした追加検討

## Case 4 (学習)



# PIDA の推定精度向上を目的とした追加検討

## Case 4 (推定)



# 学習および推定に用いる解析モデルと入力地震動

## 解析モデルの諸元

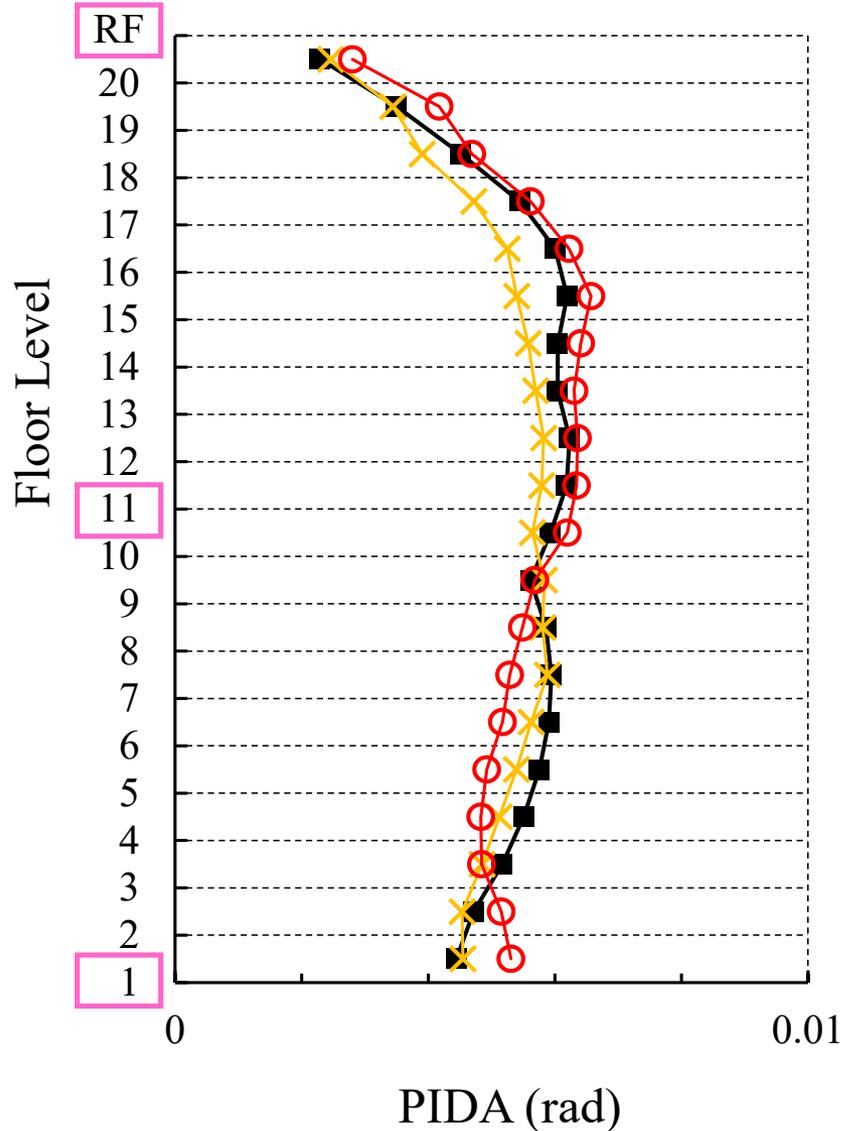
Analy. model name	$K_1$ Ratio	Natural Period (s)			Natural Frequency (Hz)		
		mode 1	mode 2	mode 3	mode 1	mode 2	mode 3
model 1	1	1.200	0.468	0.295	0.833	2.135	3.388
model 2	0.5	1.697	0.663	0.417	0.589	1.509	2.395
model 3	0.6	1.549	0.605	0.381	0.646	1.653	2.624
model 4	0.7	1.434	0.560	0.353	0.697	1.786	2.834
model 5	0.8	1.342	0.524	0.330	0.745	1.909	3.030
model 6	0.9	1.265	0.494	0.311	0.791	2.025	3.214
model 7	1.1	1.144	0.447	0.281	0.874	2.239	3.553
model 8	1.2	1.095	0.428	0.269	0.913	2.338	3.711
model 9	1.3	1.052	0.411	0.259	0.950	2.434	3.863
model 10	0.65	1.488	0.581	0.366	0.672	1.721	2.731

## 入力地震動

wave name	Observation Date	Observation Location	Component	Recording Time (s)	Max. Acc. ( $m/s^2$ )	Predominant Frequency (Hz)
wave 1	2011.03.11.14.46	茨城県 岩瀬 (IBRH11)	EW	299.99	-8.27	1.83
wave 2	2018.09.06.03.07	北海道 追分 (HKD127)	EW	283.99	9.04	3.21
wave 3	2021.02.13.23.07	宮城県 山元 (MYGH10)	NS	299.99	14.3	2.51
wave 4	2024.01.01.16.10	石川県 富来 (ISK006)	EW	299.99	-26.8	4.69
wave 5	2024.01.01.16.10	石川県 七尾 (ISK007)	NS	299.99	-3.74	0.879
wave 6	2011.03.11.14.46	宮城県 大和 (MYG009)	NS	299.99	4.51	1.45

# Case 3 および Case 4 の PIDA の高さ分布

■ Target    × Case 3  
○ Case 4    □ 観測階



■ Target と比較

Case 3

全体的に過小評価しており危険側

Case 4

中層階以上において安全側

■ Case 3 と Case 4 を比較

Case 4 の方が推定精度が高い



LSTMを用いて超高層建物のPIDAを高精度に推定するためには、**入力する絶対加速度の数が多い**ことが重要

# まとめ・今後の課題

## まとめ

- ・ 超高層RC建築物の地震応答解析に基づき，LSTMを用いて非観測階の地震時応答を推定する手法を提案
- ・ 少数の加速度センサのみで，LSTMを用いて建物全層の絶対加速度および層間変形角を良好な精度で推定可能

## 今後

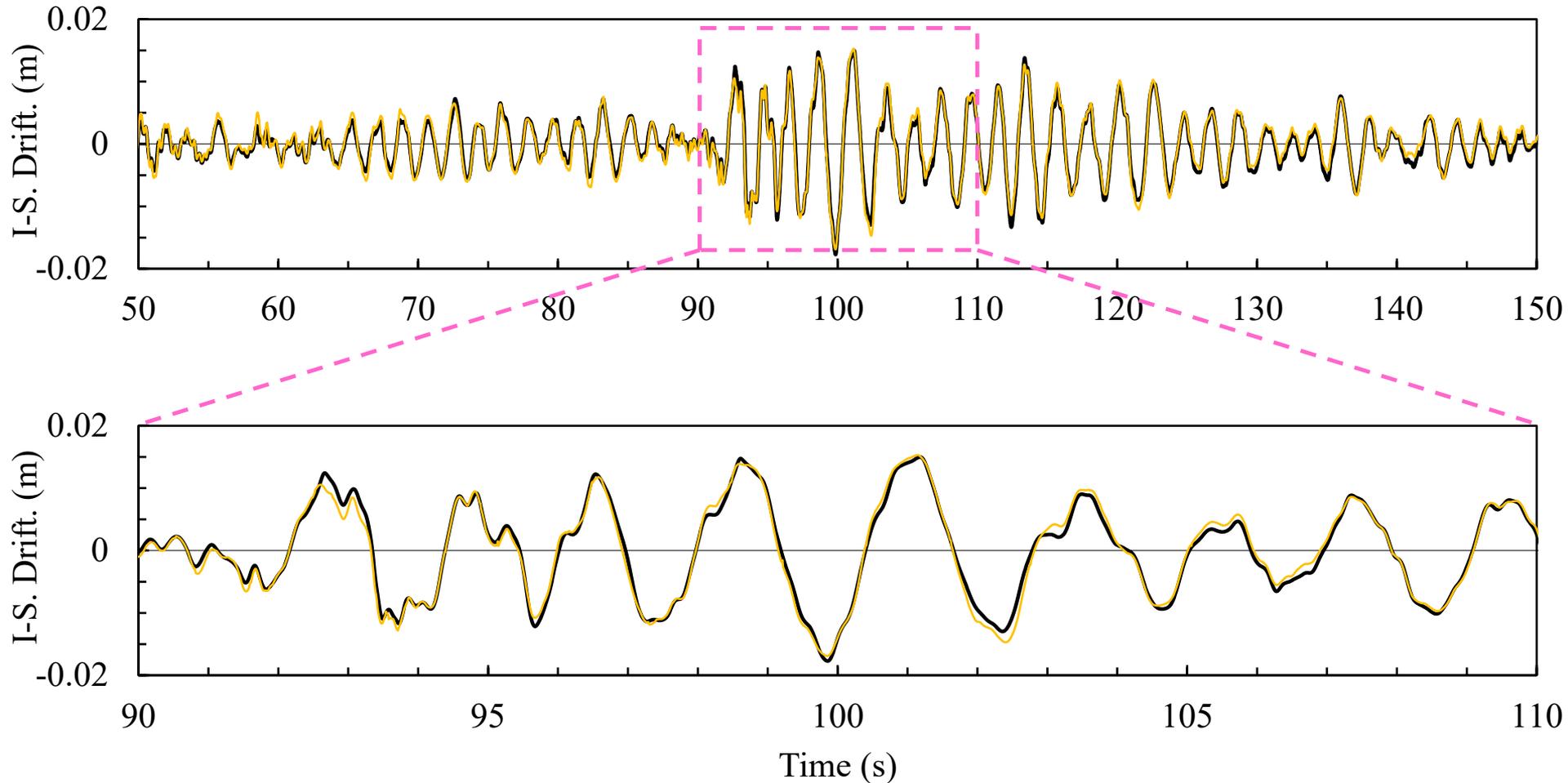
- ・  $1/100$  [rad] を超える大変形に対する推定精度をフレームモデルにて検討
- ・ 実観測記録を用いた推定精度の検討



# Case 3 の層間変形の時刻歴波形の一部

## Case 3

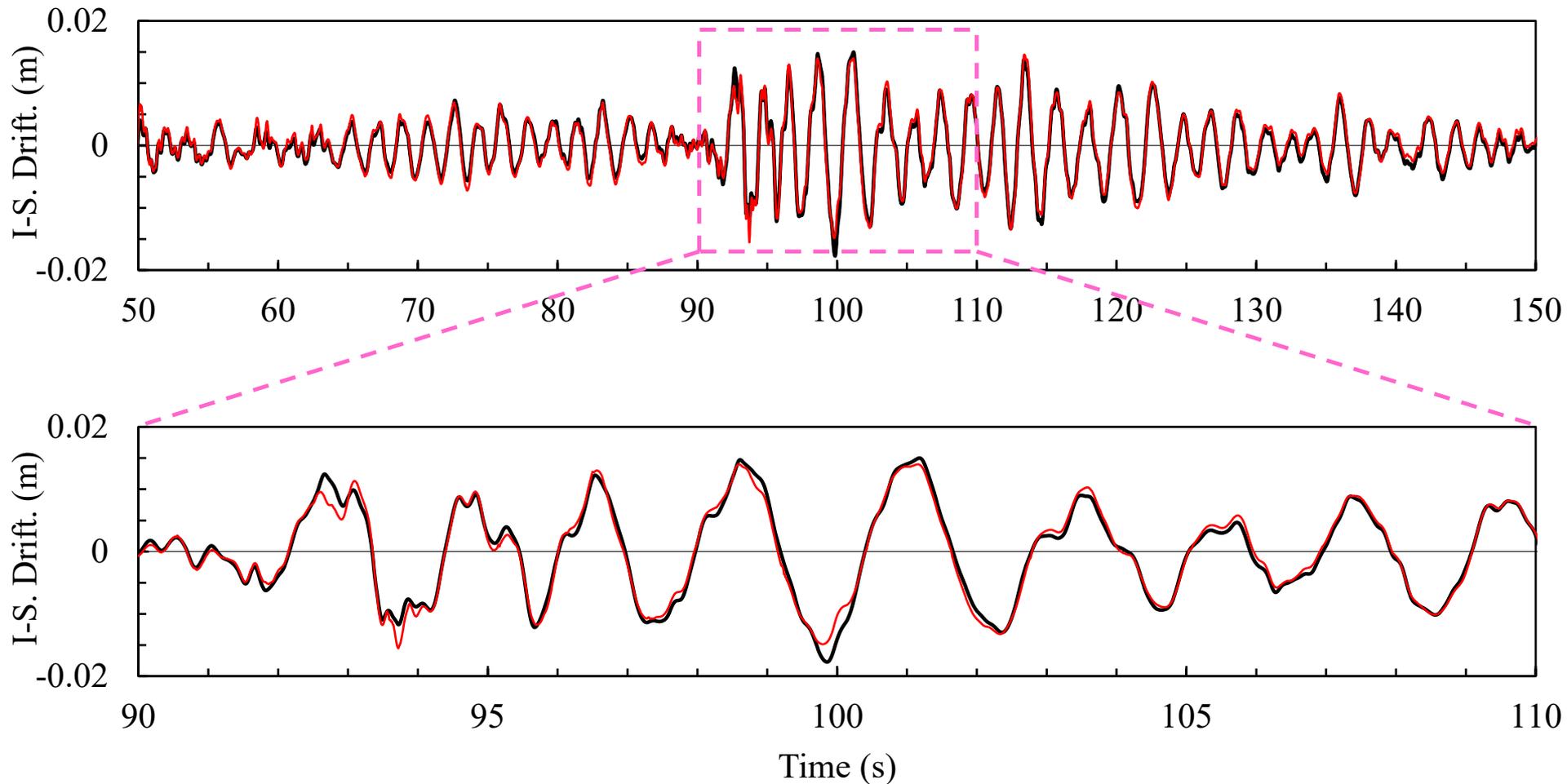
—Target\_Inter-Story Drift of 6-7th Floor — Case 3\_Inter-Story Drift of 6-7th Floor



# Case 4 の層間変形の時刻歴波形の一部

Case 4

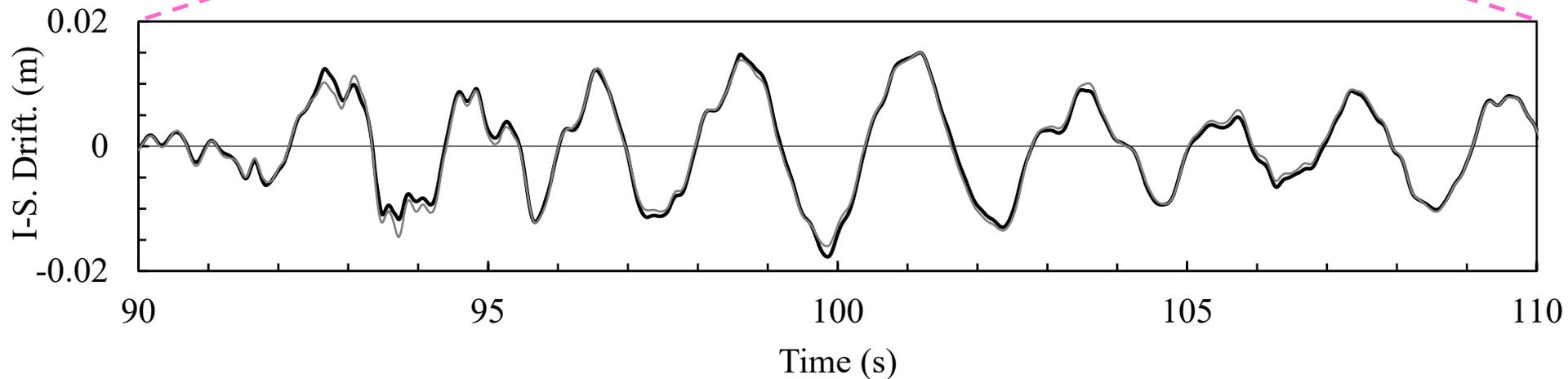
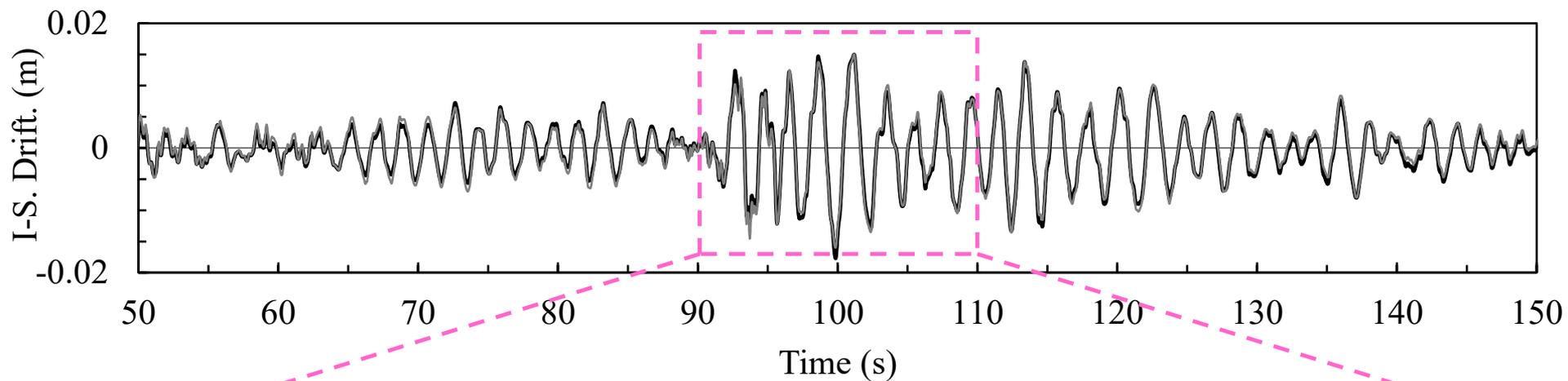
—Target\_Inter-Story Drift of 6-7th Floor —Case 4\_Inter-Story Drift of 6-7th Floor



# Case 5 の層間変形の時刻歴波形の一部

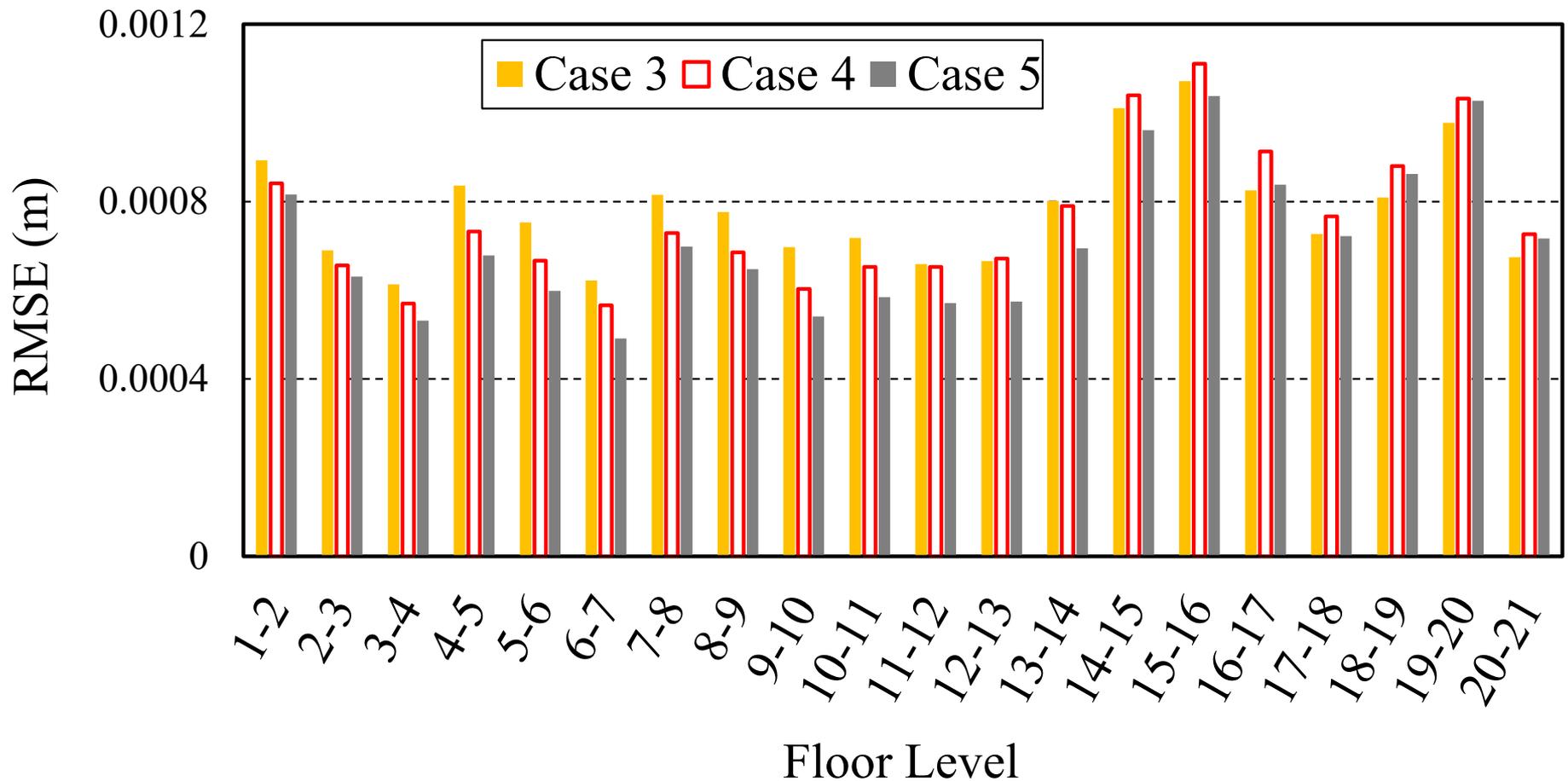
Case 5

—Target\_Inter-Story Drift of 6-7th Floor —Case 5\_Inter-Story Drift of 6-7th Floor

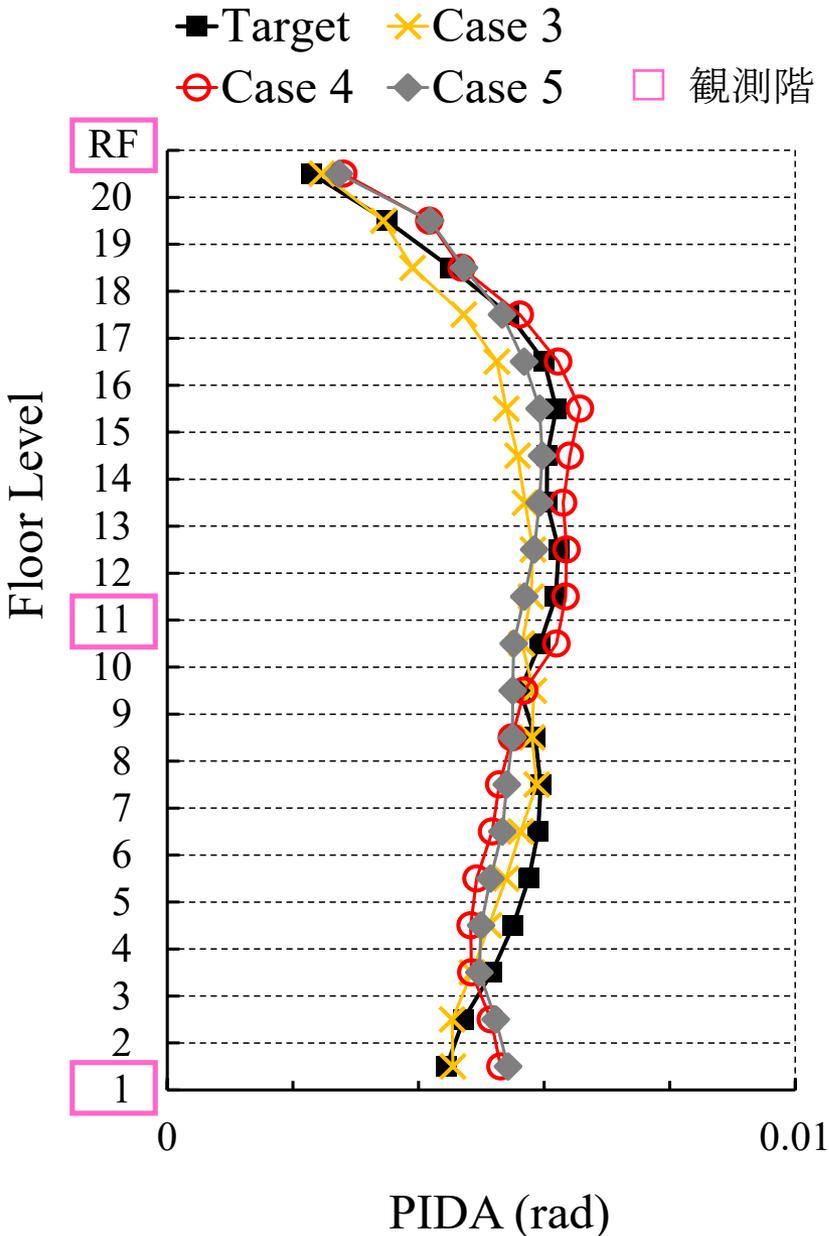


# Case 3 ~ Case 5 の誤差比較

各階でのTargetと推定値の誤差を基に算出した  
二乗平均平方根誤差 (Root Mean Squared Error, **RMSE**)



# 幻の Case 5



## Case 3

入力: 観測階の絶対加速度  
(SNAPによる地震応答解析)

出力: 全層の層間変形  
(SNAPによる地震応答解析)

## Case 4

入力: 全層の絶対加速度  
(Case 2 の推定含む)

出力: 全層の層間変形  
(SNAPによる地震応答解析)

## Case 5

入力: 全層の絶対加速度  
(SNAPによる地震応答解析)

出力: 全層の層間変形  
(SNAPによる地震応答解析)

# 参考文献

- 1) 国土交通省 国土技術政策総合研究所，独立行政法人 建築研究所：平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震被害調査報告，2012 年 3 月
- 2) 永野正行，肥田剛典，渡辺一弘，田沼毅彦，中村充，井川望，保井美敏，境茂樹，森下真行，川島学：2011 年東北地方太平洋沖地震時の強震記録に基づく関東・関西地域に建つ超高層集合住宅の動特性，日本地震工学会論文集，2012 年 12 巻 4 号 p.4\_65-4\_79
- 3) Kozo system: SNAP Ver. 8, <https://www.kozo.co.jp/index.php> (参照 2025.9.20)
- 4) 防災科学技術研究所(NIED)：強震観測網（K-NET, KiK-net），<https://www.kyoshin.bosai.go.jp/> (参照 2025.9.20)
- 5) 日野浦雄高，永野正行，鈴木賢人，肥田剛典，北堀隆司，田沼毅彦，小田聡：超高層集合住宅を対象とした非線形多質点系モデルの構築と 2016 年熊本地震時の地震応答推定，日本建築学会構造系論文集，第 83 巻，第 749 号，pp.963-973，2018.7
- 6) 神原浩，吉田直人，富吉雄太：超々高層建物の振動計測による固有周期の評価，清水建設研究報告，第 102 号，pp.7-14，2024 年 12 月